

Эксперименты показали, что создавая плазму с приемлемыми параметрами в нужных вакуумных условиях ВЧ источник создает мощные ВЧ помехи, препятствующие диагностированию процесса сепарации с помощью электростатических зондов всех модификаций. Поэтому в условиях этого предварительного эксперимента регистрация велась только оптическим методом, не чувствительным к помехам. Очевидно, что для подавления ВЧ помех необходимы дополнительные работы. Идентификация сорта ионов в области светящихся колец возможна с помощью методов элементного анализа поверхностей.

Список литературы: 1. И.К.Киконин Таблицы физических величин. Справочник. – М.: Атомиздат, 1976. 2. A.Litvak, S.Agnev, F.Anderegg and others Archimeds Plasma Mass Filter // 30th EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., St. Petersburg, 7-11 July 2003 ECA. – Vol. 27A, O-1.6A. 3. S.Putvinsk, A.F.Agnev, B.P.Cluggish, T.Ohkawa and other Archimedes Mass Filter Vaporizer. American Physical Society, 43rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics October, 29 – November, 2, 2001 Long Beach, California, abstract #KP1.053. 4. А.Н.Довбня, А.М.Егоров, В.Б.Юферов и др. Сравнительный анализ проектов плазменных сепараторов изотопов с колебаниями на циклотронных частотах // Вопросы атомной науки и техники. – 2004. – № 4. – Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (3). – С. 323-325. 5. А.М.Рожков, К.Н.Степанов и др. Исследование возбуждения ионно-циклотронных колебаний в плазме, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. – «В.1. Наукова Думка». – Киев. – 1971. – С. 14-18. 6. А.М.Рожков, К.Н.Степанов, и др. Резонансная циклотронная неустойчивость во вращающейся плазме // Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. – «В.3. Наукова Думка». – Киев. – 1972. – С. 193-202.

Поступила в редколлегию 15.11.2006.

УДК 537.528:537.529

В.С.ГЛАДКОВ, канд.техн.наук; **Л.В.БАВРИВ**, канд.фіз.-мат.наук;
О.А.ГУЧЕНКО; **О.В. ШЕСТЕРІКОВ**; НТУ «ХПІ»

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУЙНУВАННЯ БЕТОНУ ПРИ ДІЇ ІМПУЛЬСІВ НАПРУГИ НАНОСЕКУНДНОГО ДІАПАЗОНУ

Запропоновано математичну модель руйнування бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону. Модель базується на механізмі електричного пробоя бетону за рахунок розвитку розряду в повітряних порах бетону внаслідок розвитку перегрівної несталості в плазмі стримерного каналу. Модель, що пропонується, дозволяє визначати склад продукту руйнування, який утворюється в результаті електричного пробоя бетону, як функцію параметрів генератора імпульсів напруги, характеристик матеріалу та тривалості фронту імпульсу напруги.

A mathematics model for breaking the concrete by action of the nanosecond voltage pulses has been offered. This model is based on a mechanism of electric breakdown of a concrete caused by the development of a discharge in the air concrete pores due to the superheat unsteadiness in plasma of a

streamer channel. The offered model allows for the determination of a composition of a crushed product that results from the electric concrete breakdown as a function of parameters of the voltage pulses generator, material characteristics and voltage pulse front duration.

Метою роботи є розробка математичної моделі руйнування бетону при дії наносекундних імпульсів напруги.

Побудування математичних моделей руйнування, як відомо, проводиться двома шляхами:

- створенням феноменологічних моделей, які не враховують фізичних явищ, але дають зв'язок вхідних та вихідних параметрів;
- створенням кінетичних моделей, котрі враховують основні фізичні явища і дозволяють в будь-який момент часу описати стан системи.

Перші типи моделей прив'язані, як правило, до конкретної конструкції апарату та виду сировини. Хоч такі моделі дозволяють якось вирішувати питання оптимізації конкретного процесу руйнування в заданих діапазонах зміни факторів, що варіюються, але не дозволяють вирішувати загальні завдання. Треба відмітити, що особливістю електроімпульсного руйнування є його дискретний характер, який зв'язаний з імпульсною передачею енергії середовищу, тому для опису характеристик руйнування найбільш прийнятним є кінетичний підхід, коли кожна одинична дія викликає дискретну зміну стану середовища. В [1] вперше була висловлена думка, що електроімпульсне руйнування слід розглядати, як сукупність стрибкоподібних випадкових процесів.

У [2] розроблено математичну модель дезінтеграції (дрібнення) матеріалів, в якій можна виділити такий ланцюжок явищ:

- формування в робочому об'ємі ланцюжка шматків, які мають найбільшу імовірність електричного пробоя (функція відбору);
- руйнування кожного елементу ланцюжка на окремі осколки, що приводить до зміни гранулометричного змісту середовища (функція розлому);
- виведення з процесу руйнування частини осколків, у яких максимальні розміри визначаються вимогами технології (функція відсіву).

На базі розгляду конкретних явищ цих функцій був розроблений алгоритм розрахунку кінцевих показників електроімпульсного дрібнення (дезінтеграції) матеріалів [2].

Використати в нашому випадку розробки моделі електроімпульсної дезінтеграції, що наведені у [2], неможливо, бо вони цілком базуються на дрібненні осколків матеріалів (гірських порід) з потрібним гранулометричним складом. У нашому випадку треба розглядати електроімпульсне руйнування великого шмату бетону, а не ланцюжка осколків, і не треба розглядати явища, які зв'язані з функціями відбору та відсіву, бо нам не висуваються якісь вимоги щодо гранулометричного складу осколків бетону. На наш погляд, математичну модель руйнування бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону треба розробляти з урахуванням тільки функції розлому.

Узявши до уваги особливість вихідного продукту для електроімпульсного руйнування (монолітність, сталість властивостей та обмежений розмір), для розробки моделі руйнування може бути використана гідродинамічна модель процесу [2]. При цьому треба враховувати особливості створювання каналу розряду та виділення в ньому енергії при електричному імпульсному пробі матеріалу імпульсами напруги наносекундного діапазону. Увесь процес ділиться на дві фази – виділення енергії в каналі розряду та передача її середовищу, яке руйнується. При цьому можна вважати, що передача енергії середовищу відбувається за час, який близький до $\Delta t = 0$ відносно процесу руйнування.

При розробці моделі були зроблені такі припущення:

- за час виділення та передавання енергії середовищу ніяких реальних деформацій та відповідно руйнувань у ньому не встигає відбуватися, але кожна точка середовища здобуває відносну початкову швидкість, що характерно для рухливого нестислого середовища, тому середовище, що руйнується у першій фазі процесу моделюється рухливим нестислим середовищем при постійній його густині $\rho = \text{const}$;
- енергія, що передається середовищу, відповідає енергії, що виділяється у каналі розряду за час дії фронту імпульсу розрядного струму ($T/4$) в колі «джерело імпульсів-навантага» (у цьому діапазоні часу досягають максимальної швидкості наростання потужності в каналі розряду та його максимальний діаметр за рахунок руху стінки каналу розряду, при цьому енергія, що виділяється у наступний проміжок часу у каналі розряду, не створює суттєвих навантажень в об'ємі матеріалу, бо вона витрачається на плавлення стінок каналу розряду та видування з нього плазми крізь гирло);
- відповідальним за руйнування (друга фаза) є ударний зсув, який виникає за рахунок різниці початкових масових швидкостей в об'ємі матеріалу [3].

Як критерій руйнування використовується енергетичний критерій, виражений через критичну швидкість [4,5,6]

$$v_{кр} = \frac{\delta_s}{\sqrt{E\rho}}, \quad (1)$$

де δ_s – межа міцності на стиск (для першої фази) та межа міцності на розтягування (зона розтріскування) з урахуванням динамічного характеру прикладання навантажень [7], E – модуль пружності, ρ – густина середовища.

Основне призначення математичної моделі – визначення процесу руйнування, який створився в результаті електричного пробі матеріалу, як функції параметрів генератора імпульсних напруг (розрядної ємності C , індуктивності контуру розряду L , амплітуди імпульсу напруги $U_{\text{макс}}$, властивостей матеріалу та геометрії об'єкта, що руйнується).

Електроімпульсне руйнування зв'язане з електричним пробоем матеріалу, при цьому товщина матеріалу ℓ значно більше радіусу каналу розряду R_0 ($R_0 \ll \ell/2$), тому треба розглядати тільки циліндричну симетрію джерела навантаження. Зв'язок параметрів джерела імпульсів з розподілом миттєвих масових швидкостей у матеріалі при електричному пробі в [2] знайдено із умов на межі стінки каналу розряду при її максимальній швидкості руху ($r = R_0$). Використовуючи вираз для швидкості руху стінки вибухової камери у гідродинамічній моделі [8] та швидкості руху стінки каналу розряду [9], у [2] був одержаний вираз для середньоімовірного розміру осколку при електричному пробі матеріалу

$$\tilde{a} = \sqrt{3}\pi^{3/2} z \frac{r^2 v_{кр}}{\rho \ell U_{\max}} \frac{A}{\omega^{1/2}} \xi^{1/2}, \quad (2)$$

де r – поточний радіус, $v_{кр}$ – критична швидкість, A – параметр енергетичної дії, $A = \frac{1}{2} v_{кр} R_0 \ell$, $\xi = \frac{(4r^2 + \ell^2)^3}{48r^4 + 12r^2 \ell^2 + \ell^4}$, z – хвильовий опір кола розряду, $z = \sqrt{L/c}$, ρ – густина середовища, ℓ – товщина матеріалу, U_{\max} – амплітуда імпульсу напруги, ω – кутова частота, $\omega = 2\pi / 4t_{фр}$ (у нашому випадку відповідає тривалості фронту $t_{фр}$ наносекундного імпульсу напруги), R_0 – радіус стінки каналу розряду.

Розглядаючи (2), можна зробити висновок, що розміри середньоімовірного осколку (за усіх інших умов) залежать від U та ω , тобто від амплітуди та форми імпульсу напруги наносекундного діапазону.

У [10,11] показано, що електричний пробій бетону обумовлений електричним пробоем повітряних пор на межі «бетон-щебінь», «пісок-розчин цементу», «розчин цементу-металева арматура» та і у самому розчині. Тому в [12] було запропоновано механізм електричного пробію бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону за рахунок електричного пробію у повітряних проміжках внаслідок перегрівної несталості в плазмі стримерного каналу. Цілком зрозуміло, що розрахунок \tilde{a} в цьому випадку може бути зв'язаний тільки з розрахунками напруги електричного пробію повітряних прошарків у бетоні при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону [12] при урахуванні усіх інших складових процесу руйнування.

Запропонована математична модель руйнування бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону урахує параметри генератора імпульсів напруги, механічні характеристики бетону, амплітудно-часові параметри імпульсу напруги, а також розвиток електричного пробію в повітряних порах бетону внаслідок перегрівної несталості у плазмі стримерного каналу. Математична модель руйнування бетону, що пропонується, може стати основою для створення інженерної методики розрахунку ефективності руйнування бетону.

Список літератури: 1. Волков Ю.В. О кинетическом и феноменологическом подходе к теории разрушения // Техника высоких напряжений. – Томск, Изд. ТГУ, 1978. – С. 124-127. 2. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты, Изд. РАН. – 2002. – 325 с. 3. Николаевский В.Н. Обзор: земная кора, дилатансия и их математические модели // Механика очага землетрясения. – М., «Мир», 1982. – С. 133-215. 4. Власов О.Е. Основы теории взрыва. – М., Изд. ВИА, 1957. – 408 с. 5. Лаврентьев Н.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – М., «Наука», 1977. – С. 407. 6. Олевский В.А. Характеристики крупности продуктов измельчения и классификации // Обогащение руд. – М., 1958. – №3. – С. 14-23. 7. Алексеева Т.И., Алексеев А.А. К вопросу о нормальности распределения некоторых параметров дробления электрическими импульсными разрядами // Высоковольтная импульсная техника. – Чебоксары, Изд. гос. ун-та, 1976. – Вып. 3. – С. 89-94. 8. Лаврентьев Н.А. Кумулятивный заряд и принципы его работы // Успехи математических наук. – М., 1957. – Т. 12, вып. 4. – С. 41-57. 9. Семкин Б.В., Усов А.Ф., Курец В.И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. – Апатиты, Изд. КНЦ РАН, 1995. – 276 с. 10. Куперитох А.П., Stamatelatos C.P., Agoris D.P. Моделирование частичных разрядов в твердых диэлектриках на переменном напряжении // Сб-к XII Межд. шк. «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». – Николаев, 2005. – С. 59. 11. Танбаев Ж.Г. Импульсная электрическая прочность бетона в дециметровых промежутках // Сб-к «Изоляция высоковольтных электрофизических установок», Томск, 1988. – С. 55. 12. Гладков В.С., Яковенко И.В., Про можливий механізм електричного розряду в товщі бетону при дії імпульсів напруги наносекундного діапазону // «Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков. – 2006. – №17. – С. 152-161.

Надійшла до редколегії 25.09.2006

УДК 537.528:537.529

В.С.ГЛАДКОВ, канд. техн. наук; **О.А.ГУЧЕНКО**;
О.В.ШЕСТЕРІКОВ; НТУ «ХПІ»

ВПЛИВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОДІВ НА РУЙНУВАННЯ БЕТОНІВ ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНИМ СПОСОБОМ

Приведено основні види руйнування бетонів при застосуванні різних систем електродів. Розглянуто випадки накладання систем електродів на одну поверхню для ініціювання розряду у товщі бетону, а також для дроблення бетонів.

The main types of concrete breaking at using different electrode systems have been described. The cases of applying the electrodes systems onto one surface to initiate the concrete in-depth discharge and to perform concrete crushing have been considered.

Метою роботи є вивчення впливу систем електродів на руйнування бетону, зануреного у воду.

При руйнуванні бетону (гірських порід) електроімпульсним (ЕІ) способом найбільш прийнятними з енергетичної та технологічної точок зору є системи електродів «стержень-стержень» або «стержень-площина» [1]. Перший варіант електродів використовується для руйнування зануреного у воду бето-